

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 102 58 248.3

**Anmeldetag:** 13. Dezember 2002

**Anmelder/Inhaber:** Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen/DE

**Bezeichnung:** System zur interferometrischen Passeprüfung

**IPC:** G 01 M, G 01 N, G 01 B

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 9. Januar 2004  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag



Wallner

System zur interferometrischen Passeprüfung

- 5 Die Erfindung betrifft ein System zur interferometrischen Passeprüfung eines Prüflings mit einer asphärischen Oberfläche in Reflexion, wobei der Prüfling ein Segment (footprint) eines rotationssymmetrischen Grundkörpers (parent) ist, insbesondere für eine Spiegeloptik in der EUV-Lithographie, mit einem Interferometer, dessen optische Achse einen von Null verschiedenen Winkel zur Rotationsachse des Grundkörpers bildet und einem diffraktiven optischen Element (DOE).

Aus der DE 100 41 658 A1 ist beispielsweise ein System zur interferometrischen Passeprüfung eines Prüflings mit einer asphärischen Oberfläche bekannt. Bei der Prüfung werden refraktive und diffraktive Elemente eingesetzt. Die im System vorhandenen Fehler, welche durch ihre refraktiven Komponenten hervorgerufen werden, werden durch die Kalibrierung mit einem bekannten Kalibrierspiegel bestimmt. Das diffraktive optische Element wird hierbei in der nullten Beugungsordnung benutzt. Danach wird der asphärische Prüfling in Autokollimation gemessen, wonach alle Fehler der refraktiven Systemteile entweder vom Messergebnis abgezogen oder bei der Asphärenprüfung eliminiert werden. Die Prüfung erfolgt hier für rotationssymmetrische Prüflinge. Hierbei fällt die Rotationsachse mit der optischen Achse zusammen. Auf diese Weise ist eine Absolutmessung von nicht-rotationssymmetrischen Asphärenfehlern auch bei unbekannten Interferometerfehlern möglich, z.B. nach dem veröffentlichten Drehmittelungsverfahren aus "Absolute measurement of non-comatic aspheric surface errors; R. Freimann, B. Dörband, F. Höller. Optics Communications 161 (1999) S. 106-114 oder nach der in der DE 100 58 650 A1 beschriebenen Erweiterung.

35

Auf ähnliche Weise arbeiten auch die in der US 2001/0028462 A1 und in der US 6,312,373 B1 angegebenen Messverfahren für asphärische Flächen, insbesondere für solche, die als Spiegel

in der EUV-Lithographie eingesetzt werden. Der Nachteil besteht bei diesen Messverfahren jedoch darin, dass rotations-symmetrische Asphärenpassefehler unerkannt bleiben.

- 5 Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, eine Prüfanordnung für EUVL-Asphären-footprints zu schaffen, mit der Asphärenpassefehler bestimmt werden können, die bezüglich des rotationssymmetrischen Grundkörpers (parent) rotationssymmetrisch sind und welche mit den bereits bekannten Kom-  
10 pensationssystemen schwer ermittelt werden können.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch die in Anspruch 1 genannten Merkmale gelöst.

- Erfindungsgemäß wird zur Passeprüfung der Prüfling (footprint) in Reflexion in den Strahlengang des Interferometers, in welchem sich ebenfalls eine Referenzfläche und ein diffraktives optisches Element (DOE) befinden, gestellt. Das diffraktive optische Element, welches vorteilhafter Weise als ein computergeschriebenes Hologramm (CGH) gefertigt wird, ist notwendig, damit die Prüfwelle an jeder Stelle des asphärischen Prüflings senkrecht auftrifft. Vor der Passeprüfung ist dafür zu sorgen, dass die nicht-rotationssymmetrischen Interferometerfehler bestimmt werden und bei der Vermessung des Prüflings  
20 das Messergebnis nicht verfälschen.  
25

- Bei diesem Messverfahren besteht der wesentliche Vorteil darin, dass die bezüglich der Grundform (parent) rotationssymmetrischen Asphärenfehler hier als nicht-rotationssymmetrisch erscheinen und somit wesentlich genauer bestimmt werden können  
30 als mit den bereits bekannten Standardmessverfahren.

- Der Kern des Verfahrens ist darin zu sehen, dass die optische Achse des Interferometers nicht parallel zu der Rotationsachse der Grundform steht, sondern mit ihr einen von Null verschiedenen Winkel bildet. Die räumliche Anordnung der beiden Achsen  
35 führt dazu, dass bezüglich der Grundform rotationssymmetrische Asphärenfehler im Interferometer als bezüglich dessen Achse

nicht-rotationssymmetrisch erscheinen. Mit den zitierten Standardmethoden lassen sich bezüglich der Interferometerachse nicht-rotationssymmetrische Interferometerfehler bestimmen. Dadurch ist die Messung von bezüglich der Interferometerachse  
5 nicht-rotationssymmetrischen Fehlern des Prüflings (footprint) sehr genau möglich. Durch das erfindungsgemäße Verfahren wird die Messgenauigkeit auf die bezüglich der Grundform rotations-symmetrischen Asphärenfehler übertragen.

10 Bei Verwendung einer ebenen Ausgangswelle ist es von Vorteil, dass die Prüfwelle unter einem bestimmten Winkel auf das diffraktive optische Element auftrifft und somit Rückreflexe besser ausgeblendet werden können.

Ferner kann vorteilhafter Weise vorgesehen sein, dass die auf das CGH des diffraktiven optischen Elementes auftreffende Welle als Kugelwelle vorgesehen ist, wobei zwischen der Referenzfläche und dem diffraktiven optischen Element eine refraktive Vorsatzoptik vorgesehen ist.

20

Bei Verwendung einer Kugelwelle anstatt einer Planwelle sollte zur Erzeugung der Kugelwelle zwischen der Referenzfläche und dem diffraktiven optischen Element eine Vorsatzoptik zur CGH-Beleuchtung vorhanden sein.

25

Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen ergeben sich aus den weiteren Unteransprüchen und den nachfolgend anhand der Zeichnung prinzipmäßig beschriebenen Ausführungsbeispielen.

30

Es zeigt:

Figur 1 Eine Prinzipdarstellung einer Grundform, wobei ein Prüfling ein Segment der Grundform darstellt;

35

Figur 2 eine prinzipmäßige Darstellung der Prüfanordnung zur Messung von rotationssymmetrischen Asphärenpassefehlern der Grundform mittels einer Planwelle aus-

sendenden Interferometers;

Figur 3 eine prinzipmäßige Darstellung der Kalibrierung der nicht-rotationssymmetrischen Interferometerfehler über eine Planfläche als Vorarbeit zur Messung der in Figur 2 beschriebenen rotationssymmetrischen Asphärenpassefehler der Grundform;

Figur 4 eine prinzipmäßige Darstellung der Kalibrierung der nicht-rotationssymmetrischen Interferometerfehler über eine Kugelfläche als Vorarbeit zur Messung der in Figur 5 beschriebenen rotationssymmetrischen Asphärenpassefehler der Grundform; und

Figur 5 eine prinzipmäßige Darstellung einer alternativen Prüfanordnung zur Messung von rotationssymmetrischen Asphärenpassefehlern der Grundform mittels einer Kugelwelle.

Figur 1 zeigt eine asphärische Grundform 1, wobei eine Rotationsachse (nicht dargestellt) und eine optische Achse 3 zusammenfallen, da die Grundform 1 rotationssymmetrisch ausgebildet ist. Da in der EUVL-Optik nicht die vollständige Grundform, welche auch "parent" genannt wird, benötigt wird, wird nur ein notwendiges Segment 2, welches auch als "footprint" bezeichnet wird, gefertigt. Dies sind off-axis-Segmente.

In Figur 2 ist eine Prüfanordnung zur Messung von rotationssymmetrischen Asphärenpassefehlern der Grundform 1 dargestellt. Zur interferometrischen Prüfung des footprints 2 wird ein Interferometer 3 mit einer ebenen Ausgangswelle benötigt. Eine Referenzfläche 4, welche plan ausgebildet sein sollte, befindet sich zwischen dem footprint 2 und dem Interferometer 3. Die Referenzfläche reflektiert einen Teil der Planwelle und bildet somit die Referenzwelle für das Interferometer 3. Das Lichtbündel, welches beispielsweise von einem Laser, welcher hier nicht dargestellt ist, erzeugt wird, trifft von der Referenzfläche 4 auf ein diffraktives optisches Element 5, welches

vorteilhafter Weise als computergeschriebenes Hologramm (CGH) geschrieben wird. Das CGH 5' formt die Planwelle so um, dass die Strahlen überall senkrecht auf dem footprint auftreffen und bei einwandfrei einjustiertem footprint 2 in sich zurück-  
5 laufen.

Weiterhin ist in Figur 2 der parent 1 teilweise dargestellt, der aber nur zur Veranschaulichung dient, da er real nicht vorhanden ist. Die optische Achse 3 vom gedachten parent 1 und  
10 die optische Achse des Interferometers 3, welche nicht dargestellt ist, fallen somit nicht zusammen.

Als Laser wird in vorteilhafter Weise ein frequenzstabilisierter Laser, dessen Wellenlänge sehr genau bekannt ist, verwendet. Zusätzlich kann die aktuelle Laserwellenlänge über ein Wellenlängenmessgerät gemessen werden.

Die auf das CGH 5' einfallende Planwelle trifft geneigt auf das diffraktive optische Element 5, um Rückreflexe besser aus-  
20 blenden zu können. Die Fehler des CGH-Substrates 5 im Durchtritt können in einem Planprüfplatz vor dem Aufbringen des CGH 5' oder auch danach in der nullten Beugungsordnung absolut vermessen werden und sind somit bekannt. Des weiteren werden vor der Vermessung die nicht-rotationssymmetrischen Referenz-  
25 flächenfehler der ebenen Referenzfläche 4 mit dem bekannten und oben zitierten Drehmittelungsverfahren auf einem Standardplanwelleninterferometer absolut gemessen. Danach wird das off-axis-footprint 2 in den Strahlengang des Interferometers 3 bewegt und richtig einjustiert. Der footprint 2 weist jetzt  
30 bezüglich des parents 1 rotationssymmetrische Fehler auf. Diese sind aber bezüglich des footprints 2 nicht-rotationssymmetrisch. Da die nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Interferometers 3 vor der Messung qualifiziert wurden, können sie nun von den nicht-rotationssymmetrischen Fehlern  
35 des parents 1 getrennt werden.

Die erfindungsgemäße Lösung besteht also darin, dass durch Umgehung der Rotationssymmetrie des parents 1 die in Bezug auf

ihn rotationssymmetrischen Asphärenpassefehler als nicht-rotationssymmetrische Passefehler sehr genau gemessen werden können.

- 5 Die Kalibrierung der in Figur 2 beschriebenen Messanordnung, wird in Figur 3 dargestellt. Vor der Vermessung des asphärischen footprints 1 wird das Interferometer 3 in der nullten Beugungsordnung mit der Planplatte 6 kalibriert. Die Planplatte 6 kann entweder vorher absolut mit einem anderen Verfahren  
10 qualifiziert werden oder es wird das zitierte Drehmittlungsverfahren verwendet, um so die nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Interferometers 3 zu ermitteln. Danach kann, wie unter Figur 2 beschrieben, der footprint 2 bezüglich der rotationssymmetrischen Fehler des parents 1, die auf dem footprint 2 als nicht-rotationssymmetrisch erscheinen, vermessen werden.

- In einer alternativen Prüfanordnung, wie sie in Figur 4 dargestellt ist, kann das CGH 5' durch das Substrat 5 hindurch mit einer Kugelmelle beleuchtet werden. Dafür wird eine refraktive  
20 Vorsatzoptik 7 benötigt, welche ausführlich in der DE 100 41 658 A1 beschrieben wird. Die Vorsatzoptik 7 zur CGH-Beleuchtung dient zur Umwandlung der vom Interferometer 3 ausgehenden Planwelle in eine Kugelmelle. Der weitere Aufbau der Prüfanordnung entspricht dem Aufbau in Figur 2 (gleiche Bezugszeichen) mit dem Unterschied, dass die ausgehende Planwelle  
25 parallel zur optischen Achse ausgehend vom Interferometer 3, auf die Vorsatzoptik 7 trifft.

- Vor der eigentlichen Prüfung des off-axis-footprints 2 werden  
30 die Fehler des Interferometers 3, der Vorsatzoptik 7 und des diffraktiven optischen Elementes 5 durch einen Kugelspiegel 8, welcher anstelle des footprints 2 verwendet wird, in der nullten Beugungsordnung des CGH 5' bestimmt, wie es in Figur 4 dargestellt ist.

35

Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten. Die erste Möglichkeit wäre die Qualifizierung des Kugelspiegels 8 mit einem Standardverfahren, wobei dann die gesamten Interferometerfehler bekannt

sind. Bei der zweiten Möglichkeit wird ein eingebauter Kugelspiegel benutzt, mit welchem durch das zitierte Drehmittlungsverfahren die nicht-rotationssymmetrischen Interferometerfehler absolut ermittelt werden können. Damit sind alle  
5 refraktiven Systemteile 3, 7 und die Referenzfläche 4 genau kalibriert.

Es ist aus Messungen an bestimmten CGHs mit einem anderen absoluten Messverfahren, welches in der DE 101 25 785 A1  
10 beschrieben wird, bekannt, dass CGH-Strukturen mit modernen Schreibern sehr genau geschrieben werden können. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass in der von null ( $m \neq 0$ ) verschiedenen Nutzbeugungsordnung die asphärische Prüfwelle vernachlässigbar kleine Fehler aufweist.

15 Sind die Fehler des Interferometers 3, der Vorsatzoptik 7 und des diffraktiven optischen Elementes 5 bekannt, kann nun, wie in Figur 5 dargestellt, der off-axis-footprint 2 anstelle des Kugelspiegels 8 genau einjustiert werden. Die vom off-axis-footprint 2 bezüglich des parents 1 rotationssymmetrischen  
20 Fehler erscheinen nun als nicht-rotationssymmetrische Fehler. Da die nicht-rotationssymmetrischen Fehler des Interferometers 3 genauso bekannt sind, können nun die nicht-rotationssymmetrischen Fehler vom footprint 2 genau gemessen werden.

25 Wichtig ist hier für die Vermessung des footprints 2, dass von den bezüglich der Interferometerachse nicht-rotationssymmetrischen footprint-Fehlern auf die rotationssymmetrischen Fehler des parents 1 rückgeschlossen werden muss, da diese er-  
30 mittelt werden sollen.

Alle Messungen des off-axis-footprints 2 werden in einer von null ( $m \neq 0$ ) verschiedenen Beugungsordnung durchgeführt.

35 Bei Beleuchtung des CGH 5' mit einer Kugelwelle ist es vorteilhaft, dass der Krümmungsradius der Kugelwelle so gewählt werden kann, dass die Liniendichte des CGH 5' in einem vor-



teilhaften Bereich liegt. Die Liniendichte des CGH 5' kann beispielsweise so klein gehalten werden, dass das CGH 5' durch skalare Methoden ausreichend genau beschreibbar bleibt und rigorose Störeffekte nicht nennenswert auftreten.

5

Das CGH 5' kann hier als Chrommaske, also als Amplitudenhologramm oder auch als Phasenhologramm ausgeführt sein. Die letztere Ausführungsform führt zu einem höheren Beugungswirkungsgrad, wobei ein wesentlich höherer Kontrast im Interferogramm erreicht werden kann.

10

Da Asphärendejustagen zu zusätzlichen Aberrationen im Interferogramm führen, ist es sinnvoll, den asphärischen footprint 2 relativ zum Prüfaufbau sehr genau einzustufen und seinen Justagezustand präzise sicherzustellen. Dies kann beispielsweise durch hochgenaue mechanische Fassungstechnik geschehen oder durch eine Messung der Asphärenposition relativ zum Prüfaufbau.

15

Die durch Justageungenauigkeiten verursachten Aberrationen können auch in einem gewissen Umfang mathematisch eliminiert werden, beispielsweise nach dem von T. Dresel, N. Lindlein und J. Schwider in Optik 112 No.7 (2001), S. 304-308 veröffentlichten Verfahren.

20

Da die Beugung durch das CGH 5' stark von der Wellenlänge des Lichts abhängt, kann es vorteilhaft sein, einen frequenzstabilisierten Laser zu verwenden und den Brechungsindex der Luft  $n_L$  durch Messung von Luftdruck und Lufttemperatur genau zu bestimmen. Es wäre auch möglich, den Prüfaufbau zur Erhöhung der Messgenauigkeit mit Stickstoff oder Helium zu spülen.

25

30

Bei Beleuchtung des CGH 5' mit einer Kugelwelle kann die Vorsatzoptik 7 aplanatisch ausgeführt werden. Damit kann Dejustagekoma vermieden werden, so dass die Koma auf dem footprint 2 genauer ermittelt werden kann.

35

Ein weiterer Vorteil dieser Prüfanordnung ist, dass für das diffraktive optische Element 5 auch bei erhabenen EUVL-

Asphären nur die Größe des realgefertigten Asphärenfootprints  
2 notwendig ist.

# Patentansprüche:

1. System zur interferometrischen Passeprüfung eines Prüflings mit einer asphärischen Oberfläche in Reflexion, wobei der Prüfling (2) ein Segment (footprint) eines rotationssymmetrischen Grundkörpers (1) (parent) ist, insbesondere für eine Spiegeloptik in der EUV-Lithographie, mit einem Interferometer (3), dessen optische Achse einen von Null verschiedenen Winkel zur Rotationsachse des Grundkörpers bildet und einem diffraktiven optischen Element (5), durch welches die in dem Interferometer (3) erzeugten und in das diffraktive optische Element (5) einfallenden Strahlen so umgeformt werden, dass sie senkrecht auf den Prüfling (2) treffen und von dort aus in sich zurücklaufen, wobei sich zwischen dem Interferometer (3) und dem diffraktiven optischen Element (5) eine Referenzfläche (4) zur Erzeugung einer für ein Interferogramm erforderlichen Referenzwelle befindet, wobei vor der Passeprüfung nicht-rotationssymmetrische Interferometerfehler bestimmt werden, und wonach der Prüfling in einer von  $m \neq 0$  verschiedenen Beugungsordnung vermessen wird, wobei von den bezüglich der optischen Achse des Interferometers nicht-rotationssymmetrischen Fehlern des Prüflings (2) auf die rotationssymmetrischen Fehler der Grundform (1) geschlossen wird.
2. System nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur Bestimmung der nichtrotationssymmetrischen Interferometerfehler in der nullten Beugungsordnung anstelle des Prüflings (2) eine Planplatte (6) vorgesehen ist.
3. System nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die auf ein CGH (5') des diffraktiven optischen Elementes (5) auftreffende Welle als Planwelle vorgesehen ist.
4. System nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Prüfwelle unter einem Winkel auf das diffraktive optische Element (5) auftrifft.

5. System nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die auf das CGH (5') des diffraktiven optischen Elementes (5) auftreffende Welle als Kugelwelle vorgesehen ist.
- 5 6. System nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen der Referenzfläche (4) und dem diffraktiven optischen Element (5) eine refraktive Vorsatzoptik (7) vorgesehen ist.
- 10 7. System nach Anspruch 1, 5 und 6, dadurch gekennzeichnet, dass zur Bestimmung der nicht-rotationssymmetrischen Interferometerfehler in der nullten Beugungsordnung anstelle des Prüflings (2) ein Kugelspiegel (8) vorgesehen ist.
8. System nach Anspruch 3 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass das CGH (5') als Chrommaske ausgebildet ist.
9. System nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass das CGH (5') als Amplitudenhologramm oder als Phasenhologramm ausgeführt ist.
- 20 10. System nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die refraktive Vorsatzoptik (7) aplanatisch ausgeführt ist.
- 25 11. System nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass als Lichtquelle ein frequenzstabilisierter Laser verwendet wird.
12. System nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass eine aktuelle Lichtwellenlänge durch ein Wellenlängenmessgerät oder indirekt über eine Bestimmung von Lufttemperatur, Luftdruck oder Luftfeuchte bestimmt wird und durch Abweichungen vom Sollwert verursachte Messfehler aus dem Messergebnis eliminiert werden.
- 30 13. System nach einem der Ansprüche 5 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass eine Liniendichte des CGH (5') so wählbar ist, dass CGH (5') durch skalare beugungsoptische Methoden
- 35

ausreichend genau beschreibbar ist.

## Zusammenfassung:

### System zur interferometrischen Passeprüfung

(Figur 2)

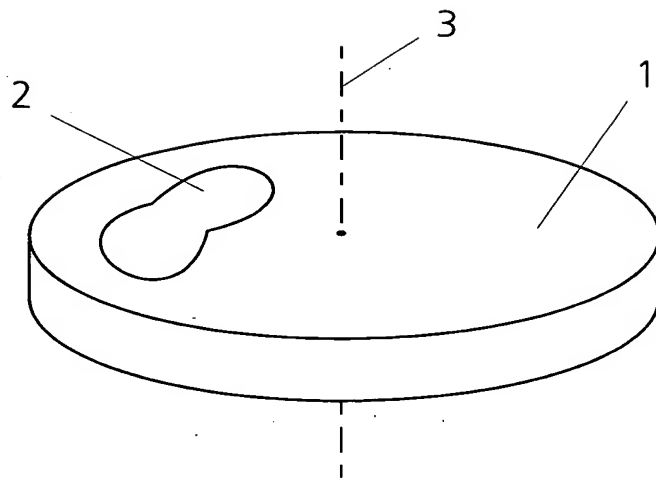
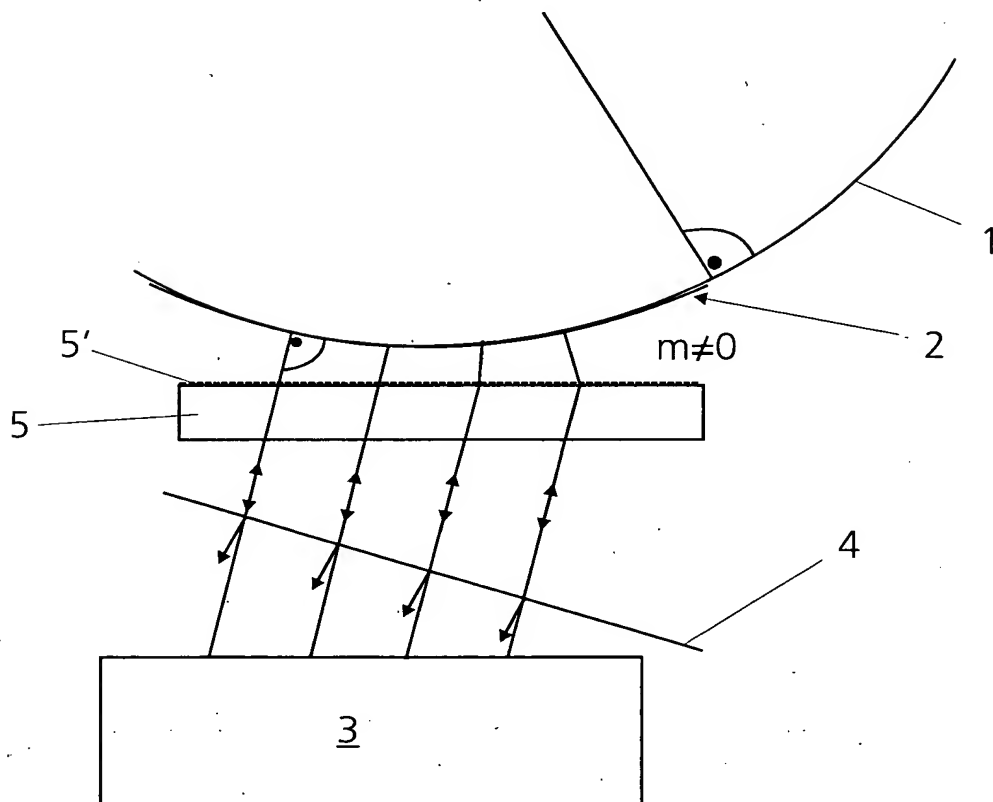
5

10

20

25

Ein System zur interferometrischen Passeprüfung eines Prüflings mit einer asphärischen Oberfläche in Reflexion, wobei der Prüfling ein Segment (2) (footprint) eines rotationssymmetrischen Grundkörpers (1) (parent) ist, insbesondere für eine Spiegeloptik in der EUV-Lithographie, weist ein Interferometer (3), dessen optische Achse einen von Null verschiedenen Winkel zur Rotationsachse des Grundkörpers bildet und ein diffraktives optisches Element (5) auf. Die in dem Interferometer (3) erzeugten und in das diffraktive optische Element (5) einfallenden Strahlen werden so umgeformt, dass sie senkrecht auf den Prüfling (2) treffen und von dort aus in sich zurücklaufen, wobei sich zwischen dem Interferometer (3) und dem diffraktiven optischen Element (5) eine Referenzfläche (4) zur Erzeugung einer für ein Interferogramm erforderlichen Referenzwelle befindet. Vor der Passeprüfung werden nicht-rotationssymmetrische Interferometerfehler bestimmt. Danach wird der Prüfling (2) in einer von  $m \neq 0$  verschiedenen Beugungsordnung vermessen, wobei von den bezüglich einer Interferometerachse nicht-rotationssymmetrischen Fehlern des footprints (2) auf die rotationssymmetrischen Fehler des parents (1) geschlossen wird.

Fig. 1Fig. 2

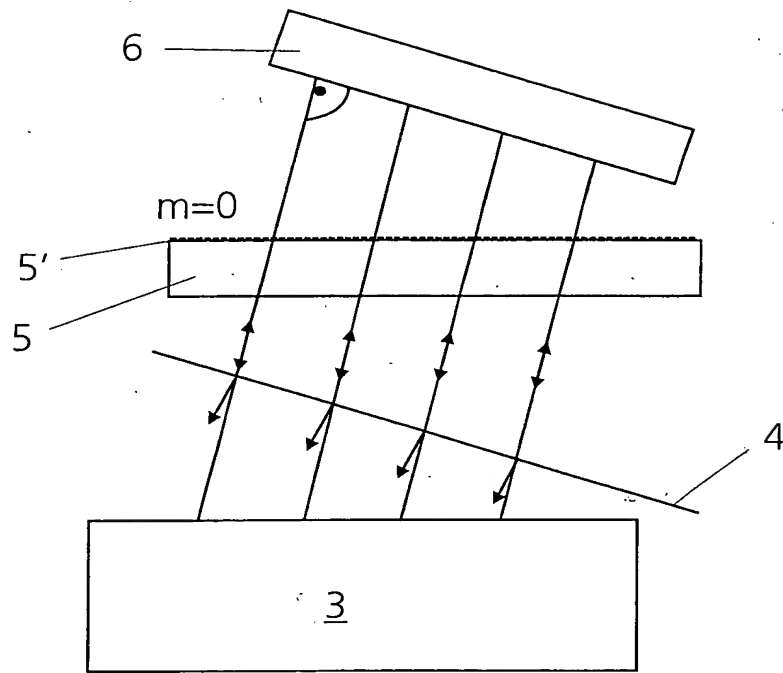


Fig. 3

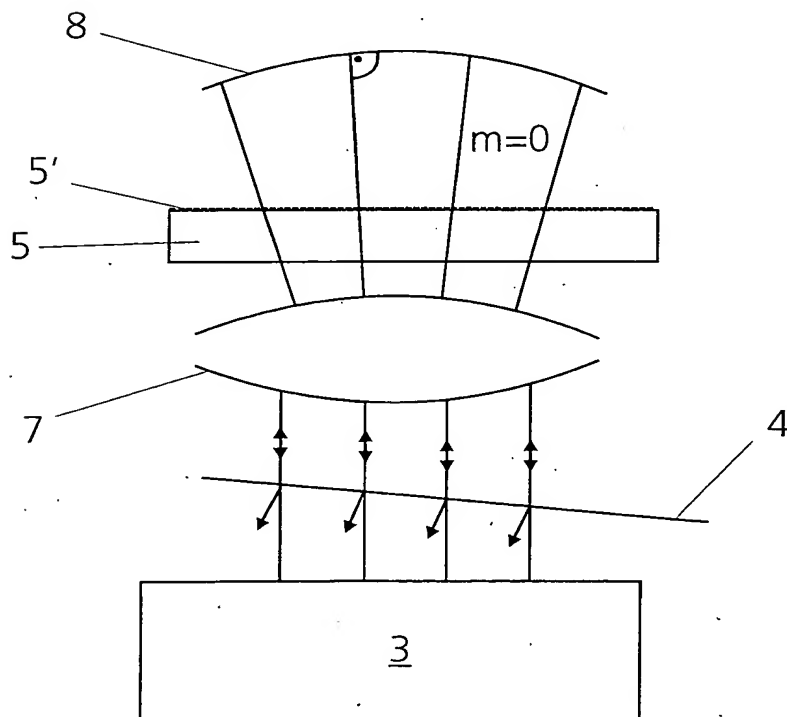


Fig. 4



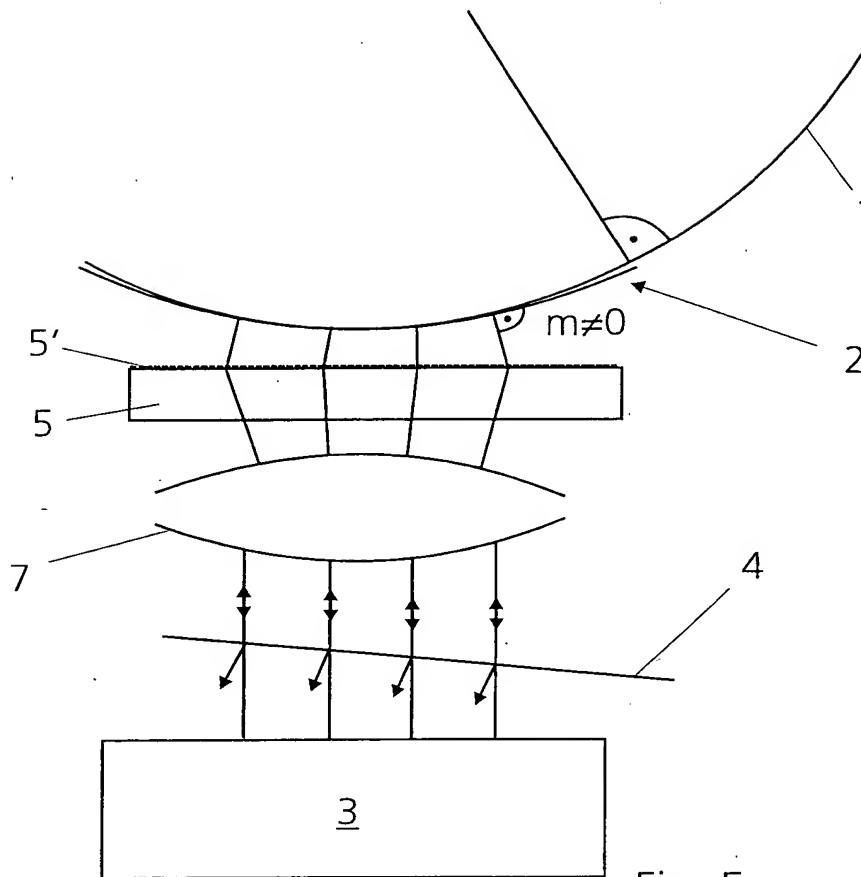


Fig. 5